Journal of Agroecology
Homepage: https://agry.um.ac.ir/

Research Article
Vol. 14, No. 4, Winter 2023, p. 713-729

Simulation of Phonological Development and Growth Duration in Sorghum (*Sorghum bicolor* L.) using SSM-iSorghum Model (Case Study: Gorgan County)

Ali Rahemi Karizaki[1*], Hamid Kouhkan[2], Mohammad Taghi Feyzbakhsh[3] and Nabi Khaliliaqdam[4]

Received: 19-11-2020
Revised: 06-08-2021
Accepted: 16-08-2021
Available Online: 16-08-2021

How to cite this article:
Rahemi Karizaki, A., Kouhkan, H., Feyzbakhsh, M.T., and Khaliliaqdam, N., 2023. Simulation of phonological development and growth duration in sorghum (*Sorghum bicolor L.*) using SSM-iSorghum model (Case study: Gorgan County). Journal of Agroecology 14(4): 713-729.
DOI: 10.22067/agry.2021.67229.0

Introduction

Sorghum (*Sorghum bicolor L.*) belongs to the cereal family and was domesticated at the same time as other cereals around three thousand years ago. Sorghum is the fifth most important cereal in the world after wheat, rice, corn and barley. Crop modeling is one of the branches of agriculture and crop physiology that has been around for 40 years and the development of powerful and efficient computers has played a major role in the development of this field. SSM model is a simple simulator to estimate the yield of different crops and the effects of climate change. This model requires limited input and easily accessible information. The above model has been evaluated for more than 30 Iranian crop species using various evaluation parameters. Evaluation of SSM_iSorghum model to predict different stages of phenology and yield of grain sorghum under temperate humid climate conditions in Gorgan.

Materials and methods

SSM-Sorghum is a model to simulate sorghum crop phenology, growth and yield formation. The model was derived from SSM-Wheat model described by Soltani and Sinclair (2013). The sorghum model structure is the same as that wheat model except for phenology submodel. Phenology submodel is based on Alagarswamy and Ritchie (1990) with some modifications. The growth and development of sorghum were simulated using the SSM_iSorghum model based on meteorological data of Gorgan city during the years 2010 to 2011, including minimum and maximum temperature, amount of sunlight and rainfall on Kimia cultivar using different scenarios. For model input parameters including meteorological data, soil properties, crop management (using the values obtained from field experiments of 2010-2011 in the research farm of Gorgan Agricultural Research Station) was used. These experiments were performed under favorable agronomic conditions. Experiments at four different densities (17, 21, 28 and 35 plants/m^2) and five different planting dates (May 10th and May 15th of 2010, May 10th and May 15th and June 15th 2011) during two growing years in total with 20 different scenarios were performed.

Results and Discussion

The results showed that model predicted day from planting to emergence, day from planting to ripening, harvest index, biological yield and grain yield with high accuracy (R2=0.91-0.94%). In using the models to predict the performance, it has been reported that the value of the explanation coefficient should be more than 60%, which is a condition in this model. Regarding the 1:1 line between the observed yield and the simulated yield, it was found that

1- Assistant Professor, Department of Plant Production, Gonbad University, Gonbad, Iran.
2- Ph.D. Student of Agronomy, Department of Plant Production, Gonbad University, Gonbad, Iran.
3- Assistant Professor, Golestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Gorgan, Iran.
4- Assistant Professor, Department of Agriculture, Payame Noor University, Tehran, Iran.
(*- Corresponding author's Email: alirahemi@yahoo.com)

values are in the range of 15% up and down the 1: 1 line. So the model has a suitable simulation of Gorgan conditions for grain yield.

Conclusion

Evaluation of SSM-Sorghum model showed that this model simulates phenological stages, including harvest index, leaf area index, and biological yield with different planting dates and different densities with appropriate accuracy in Gorgan climatic conditions. Most of the points were in the reliable range (± 15%) of the 1:1 line, which indicates an accurate estimate of the model parameters or confirms the simulation efficiency of the model process steps. Therefore, this model can be used in farm management planning including selection of appropriate planting date and appropriate density. Although the model well simulates the phenology , it seems necessary to retest the accuracy of the model with data from various experiments and to use it in the equations if the results of this study are confirmed. Obviously, models are effective when used by analyzing physiological and ecological conditions and based on experiments and experimental measurements of the system.

Keywords: Phenological stages, Simulation, SSM-iSorghum model, Yield grain.

نشریه بوم شناسی کشاورزی
Homepage: https://agry.um.ac.ir/

مقاله پژوهشی

شبیه‌سازی مراحل فنولوژیک و طول دوره رشد سورگوم (*Sorghum bicolor* L.) دانه‌ای با استفاده از مدل SSM-iSorghum (مطالعه موردی: شهرستان گرگان)

علی راحمی کاریزکی[1*]، حمید کوهکن[2]، محمد تقی فیض‌بخش[3] و نبی‌خلیلی‌اقدم[4]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۲۹
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۵/۱۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۲۵

راحمی کاریزکی، ع.، کوهکن، ح.، فیض بخش، م.ت.، و خلیلی‌اقدم، ن.، ۱۴۰۱. شبیه‌سازی مراحل فنولوژیک و طول دوره رشد سورگوم (*Sorghum bicolor L.*) دانه‌ای با استفاده از مدل SSM-iSorghum (مطالعه موردی: شهرستان گرگان). بوم‌شناسی کشاورزی ۱۴(۴): ۷۲۹-۷۱۳.

چکیده

مدل‌سازی گیاهان زراعی یکی از شاخه‌های علم زراعت و فیزیولوژی گیاهان زراعی است که از حدود ۴۰ سال قبل به‌وجود آمده و با توسعه رایانه‌های پر قدرت و کارآمد در پیشرفت این رشته نقش عمده‌ای داشته است. در مدل SSM شبیه‌ساز ساده‌ای برای تخمین عملکرد و مراحل فنولوژیک محصولات مختلف به‌کار رفته است. هدف از این مطالعه، ارزیابی مدل SSM-iSorghum برای شبیه‌سازی مراحل مختلف فنولوژی و عملکرد سورگوم (*Sorghum bicolor* L.) دانه‌ای تحت شرایط آب و هوای معتدل مرطوب در شهرستان گرگان است. رشد و نمو سورگوم دانه‌ای با استفاده از مدل SSM-iSorghum بر پایه آمار داده‌های هواشناسی شهرستان گرگان شامل (دمای کمینه، دمای بیشینه، میزان تابش خورشید و میزان بارندگی) روی رقم کیمیا با استفاده از ۲۰ سناریو مختلف انجام شد. تراکم کاشت در چهار سطح (۱۷، ۲۱ ، ۲۸ و ۳۵ بوته در مترمربع) و زمان کاشت در پنج تاریخ (۱۰ اردیبهشت، ۱۵ اردیبهشت، ۱۰ خرداد، ۱۵ خرداد و یک تیر) شبیه‌سازی انجام شد. برای پارامترهای ورودی مدل (شامل داده‌های هواشناسی، خصوصیات خاک، مدیریت زراعی) با استفاده از مقادیر به‌دست آمده از آزمایشات مزرعه‌ای در طی دو سال زراعی ۱۳۸۹ و ۱۳۹۰ در مزرعه ایستگاه تحقیقات کشاورزی گرگان استفاده شد. نتایج مدل با استفاده از آماره‌های مبتنی بر اختلاف مقادیر شبیه‌سازی و مشاهده شده نشان داد که مدل SSM مراحل فنولوژیک در تاریخ کاشت‌های مختلف و تراکم‌های متفاوت را به‌خوبی پیش‌بینی می‌کند. بالاترین ضریب تبیین (R^2) مربوط به روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک و روز از کاشت تا زمان برداشت با مقدار ۰/۹۴ و ۰/۹۱ درصد به‌دست آمد، بنابراین مدل می‌تواند در برنامه‌ریزهای مدیریتی برای مراحل فنولوژیکی در مزرعه مورد استفاده قرار بگیرد. میزان پراکندگی نقاط شبیه‌سازی شده و مشاهده شده مراحل فنولوژی رشد، شاخص برداشت، عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه در محدوده خط ۱:۱ قرار گرفتند که نشان می‌دهد، مدل برای شبیه‌سازی مراحل فنولوژی رشد در شرایط اقلیمی شهرستان گرگان از دقت مناسبی برخوردار است. همچنین نتایج ارزیابی مدل در تاریخ‌های مختلف کاشت و تراکم‌های متفاوت نشان داد که دامنه حداقل و حداکثر عملکرد دانه شبیه‌سازی شده به‌ترتیب ۲/۲۰ و ۶/۶۰ تن و با میانگین ۳/۹۲ تن در هکتار و نزدیک دامنه حداقل و حداکثر عملکرد دانه مشاهده شده بین ۲/۳۵ و ۷/۴۳ تن و با میانگین ۴/۲۴ تن در هکتار بود که این تفاوت محدوده عملکرد می‌تواند متأثر از تاریخ‌های کاشت مختلف و

۱- استادیار گروه تولیدات گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه گنبد کاووس، ایران.
۲- دانشجوی دکتری رشته زراعت گروه تولیدات گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه گنبد کاووس، ایران.
۳- استادیار بخش زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان گلستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، گرگان، ایران.
۴- استادیار گروه کشاورزی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.
(*- نویسنده مسئول: Email: alirahemi@yahoo.com)

DOI: 10.22067/agry.2021.67229.0

تأخیر در زمان کاشت مناسب باشد. جذر میانگین مربعات خطا برابر ۰/۷۰ تن در هکتار، مقدار ضریب تبیین (R^2) برابر ۰/۷۸ درصد و شکل بین مقادیر عملکرد مشاهده شده و عملکرد شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد که داده‌ها در محدوده خطای کمتر از ±۱۵ درصد خط ۱:۱ قرار دارند، لذا مدل شبیه‌سازی مناسبی از شرایط گرگان برای عملکرد دانه داشت. بنابراین، می‌توان از مدل SSM-Sorghum در شبیه‌سازی مراحل فنولوژی در تاریخ‌های مختلف کاشت و تراکم‌های متفاوت در شرایط مطلوب آب و هوایی گرگان بهره برد.

واژه‌های کلیدی: تراکم کاشت، داده‌های هواشناسی، ضریب تبیین، عملکرد دانه

مقدمه

سورگوم زراعی (*Sorghum bicolor* L.) گیاهی چهار کربنه، یک‌ساله و از خانواده غلات است، که در ایران ذرت خوشه‌ای نامیده می‌شود (Droogers et al., 2000) . سورگوم دانه‌ای به‌عنوان غذای اصلی برای میلیون‌ها نفر در چین، هند، آفریقا تولید می‌شود. مصرف جهانی سورگوم دانه‌ای در سال ۲۰۲۰، حدود ۸۰ میلیون تن بوده است که به‌ترتیب از نظر اهمیت در بین غلات در دنیا بعد از گندم (*Triticum aestivum*)، برنج (*Oryza sativa*)، ذرت (*Zea mays*) و جو (*Hordeum vulgare*) در مقام پنجم قرار دارد (FAO, 2020). میزان پروتئین دانه آن از ۶ تا ۱۳ درصد متغیر بوده و ارقام تجاری دارای ۱۰ تا ۱۳ درصد پروتئین می‌باشند (Dehghan, 2007). سورگوم دانه‌ای به‌دلیل خصوصیات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی متحمل به خشکی بوده و نسبت به سایر گیاهان زراعی در شرایط گرم، دشوار و فواصل آبیاری طولانی متحمل‌تر و نیاز آبی کمتری دارد (Sinclair et al., 2020;). یکی از ویژگی‌های اصلی مدل‌های شبیه‌سازی محصول، امکان استفاده آن‌ها در شرایط متفاوت اقلیمی و مدیریتی است، به‌شرطی که مدل مورد مطالعه در دامنه وسیعی از شرایط مورد ارزیابی و اعتبارسنجی قرار گرفته باشد (kassie et al., 2016) با استفاده از مدل‌سازی می‌توان اثر عوامل اقلیمی، محیطی و مدیریتی بر تولید هر محصول در سطح منطقه‌ای و ملی را ارزیابی کرد. عوامل محدودکننده شامل: نور، آب، خاک و مدیریت زراعتی باعث شده در بسیاری از مناطق فاصله قابل توجهی بین عملکرد بالفعل گیاه زراعی و بالقوه ژنتیکی آن ایجاد شود (Arora et al., 2007). پیش‌بینی دقیق فنولوژی گیاهان زراعی از ویژگی‌های ضروری مدل‌های شبیه‌سازی به شمار می‌رود. عملکرد در مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی تا حد زیادی با زمان‌بندی مراحل نمو تنظیم می‌شود (Soltani & Sinclair, 2012). مدل‌های ساده شبیه‌سازی (SSM) گروهی از مدل‌های محصول هستند که قدمت آن به سال ۱۹۸۶ برمی‌گردد (Soltani & Sinclair, 2015). مدل‌ها در طی ۳۰ سال گذشته توسعه و بهبود یافته‌اند و تقریباً در تمام محصولات عمده از جمله سویا (*Glycin max* L.) (Sinclair, 1986)، ذرت (Sinclair & Muchow, 1995) ، سورگوم (Sinclair et al., 1997) ، گندم (Sinclair & Amir, 1992 ; Soltani et al., 2013)، جو (Wahbi & Sinclair, 2005)، بادام زمینی (*Arachis hypogaea*) (Hammer et al., 1995) و نخود (*Cicer arietinum*) (Soltani & Sinclair, 2011) مورد مطالعه قرار گرفته است. مدل‌هایی شبیه‌سازی ابزار مؤثری جهت طراحی تیپ‌های گیاهی، از طریق ارزیابی صفاتی هستند که باعث افزایش پتانسیل عملکرد می‌شوند و همچنین برای درک واکنش گیاهان زراعی از پویایی سیستم آب، خاک، گیاه و اقلیم استفاده می‌شود (Soltani & Sinclair, 2015). مطالعات متعددی اهمیت ترکیبی از مدل‌های رایج عمومی از سناریوهای انتشار آلاینده‌ها و مدل‌های شبیه‌سازی محصولات برای بررسی تغییرات احتمالی اثرات تغییر اقلیم برمحصولات مختلف در مناطق خشک و نیمه خشک انجام شده است (Soltani et al., 2020). مدل SSM-iSorghum (Soltani & Sinclair, 2012) یک مدل ساده برای سورگوم می‌باشد که با کمک آن می‌توان عملکرد این گیاه و محدودیت‌های ژنتیکی، محیطی و مدیریتی در تولید را تجزیه و تحلیل کرد. از آنجایی که این مدل از صفحات برنامه اکسل شرکت مایکروسافت برای ورود و خروجی استفاده می‌کند، کار با آن ساده است (Soltani, 2011). در این مدل، روش کمّی‌سازی پیش‌بینی نمو فنولوژیکی در سورگوم تابعی از دما، طول دوره رشد رویشی مورد بررسی قرار می‌گیرد و با توجه به اینکه تعداد زیادی از فرآیندهای فیزیولوژیک و مورفولوژیک با مرحله فنولوژیک تغییر می‌کنند، کمّی کردن دقیق مراحل نمو فنولوژیک برای هر یک از مدل‌های شبیه‌سازی رشد ضروری است. مراحل مهم فنولوژیک که برای شبیه‌سازی فرآیندهای فیزیولوژیکی رشد و عملکرد سورگوم نیاز است به شرح زیر هستند: روز از کاشت تا سبز شدن، روز از کاشت تا انتهای رشد رویشی، روز از کاشت تا شروع

خوشه‌دهی، روز از کاشت تا پایان رشد برگ روی ساقه اصلی، روز از کاشت تا گل‌دهی، روز از کاشت تا شروع رشد دانه، روز از کاشت تا رسیدن فیزیولوژیک و روز از کاشت تا زمان برداشت (Soltani & Sinclair, 2012) در این مدل می‌توان واحد دمایی تجمعی مورد نیاز برای یک مرحله را بر حسب تعداد روز تقویمی مورد نیاز برای یک مرحله فنولوژیک بیان کرد که اصطلاحاً به آن روز زیستی (روز بیولوژیک) مورد نیاز اطلاق می‌شود. سلطانی و همکاران (Soltani et al., 2013) با بررسی مدل SSM-Wheat با استفاده از داده‌های مستقل مورد ارزیابی قرار دادند و نتایج حاصل کارآیی قابل قبول برای فرایندهای مهم گیاه زراعی در مقایسه با نتایج آزمایشات انجام شده نشان داد که صفات تعداد روز تا گرده‌افشانی (۴/۵ درصد =CV، R^2=۰/۹۸) ، رسیدگی فیزیولوژیک (۵/۶ درصد =CV، R^2=۰/۹۶) دارای بیشترین کارآیی و دقت می‌باشند. ژئوفری و همکاران (Geoffrey et al., 2018) با استفاده از مدل پیش‌بینی عملکرد ذرت بر اساس داده‌های آب و هوایی فصلی در شرق آفریقا عنوان کردند که تأخیر در کاشت ذرت منجر به کاهش عملکرد بر طبق پیش‌بینی می‌شود. همچنین دهقان (Dehghan, 2007) بیان داشت، تغییر در تاریخ کاشت ممکن است با تأثیر بر انطباق مراحل رشد گیاه با شرایط محیطی، در میزان رشد رویشی و زایشی و عملکرد گیاه سورگوم تأثیر بگذارد. یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر نمو فنولوژیک، روابط بین منبع و مخزن و اختصاص مواد فتوسنتزی به قسمت‌های مختلف یک گیاه، زمان کاشت است (Feyzbakhsh et al., 2014). به‌رغم پیشرفت‌های ژنتیکی، بروز عوامل محدودکننده نظیر اقلیم، خاک و مدیریت زراعی باعث گردیده است، در بسیاری از مناطق کشت، فاصله قابل توجهی بین عملکرد برداشتی زارعین و پتانسیل-عملکرد ژنتیکی ایجاد شود. رشد محصول و تولید مواد غذایی به تغییرات آب و هوایی حساس است (Kobayashi, 2000). مدل SSM، شبیه‌ساز ساده‌ای برای تخمین عملکرد محصولات زراعی و تأثیر تغییرات اقلیمی است. این مدل به اطلاعات محدود ورودی و آسان قابل دسترس نیاز دارد (Soltani et al., 2020). سلطانی و سینکلر (Soltani & Sinclair, 2015) با به‌کارگیری مدل SSM-iCrop2 پیش‌بینی قابل قبولی از عملکرد محصول و تبخیر و تعرق برای انواع مختلف گونه‌های گیاهی در ایران ارائه دادند، مدل SSM برای بیش از ۳۰ گونه زراعی ایران با استفاده پارامترهای متعدد ارزیابی شده از آزمایشات صحرایی انجام شده است. هدف از این مطالعه، ارزیابی مدل SSM-iSorghum در شبیه‌سازی پارامترهای مختلف رشد، از طریق مقایسه پارامترهای شبیه‌سازی شده با نتایج مشاهده شده در مزرعه و همچنین ارزیابی توانایی مدل در پیش‌بینی زمان وقوع مراحل مهم فنولوژیک در شرایط اقلیمی معتدل مرطوب در شرایط شهرستان گرگان است.

مواد و روش‌ها

آزمایشات مزرعه‌ای: این آزمایش طی دو سال زراعی مختلف ۱۳۸۹ و ۱۳۹۰ در شرایط مطلوب عاری از آفات، علف‌های هرز و بیماری‌های سورگوم در ایستگاه تحیقات کشاورزی گرگان واقع در پنج کیلومتری شمال گرگان با عرض جغرافیایی۳۶ درجه و ۵۴ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۴ درجه و ۲۵ دقیقه شرقی، با ارتفاع پنج متر بالاتر از سطح دریا و میزان بارندگی سالانه ۴۵۰-۴۰۰ میلی‌متر به اجرا درآمد، مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک محل انجام آزمایش در جدول ۱ ارایه شده است. آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار و در چهار تراکم مختلف و پنج تاریخ کاشت متفاوت طی دو سال زراعی در مجموع با ۲۰ سناریو مختلف انجام شد. تراکم کاشت در چهار سطح (۱۷، ۲۱ و ۲۸ و ۳۵ بوته در مترمربع) و تاریخ کاشت در پنج سطح (۱۰ اردیبهشت، ۱۵ اردیبهشت، ۱۰ خرداد، ۱۵ خرداد و یک تیر) بود. هر تیمار در چهار خط به‌طول شش متر با فاصله ۶۰ سانتی‌متر کشت شد. تراکم‌های مورد نظر با توجه به ثابت بودن فاصله خطوط بر روی ردیف‌های کشت اعمال شد. مقدار کود مصرفی در همه تیمارها یکسان بود و بر اساس آزمون خاک مقدار ۱۳۸ کیلوگرم فسفر از منبع فسفات آمونیوم، ۱۹۲ کیلوگرم نیتروژن از منبع اوره و فسفات آمونیوم و ۶۰ کیلوگرم کود پتاسیم از منبع فسفات پتاسیم استفاده شد. یک سوم از کود اوره در زمان کاشت و دو سوم باقیمانده در مرحله ۸-۶ برگی و همزمان با آبیاری به خاک اضافه شد. مبارزه با علف‌های هرز به‌شکل دستی انجام شد. آبیاری هر ۱۵-۱۰ روز متناسب با نیاز گیاه به‌صورت نشتی انجام شد. صفات فنولوژی ثبت شده در این تحقیق شامل تمامی مراحل مهم فنولوژیک از جمله روز از کاشت تا سبز شدن، روز از کاشت تا پایان مرحله رویشی، روز از کاشت تا شروع خوشه‌دهی، روز از کاشت تا پایان رشد برگ روی ساقه اصلی، روز از کاشت تا گل‌دهی، روز از کاشت تا شروع رشد دانه، روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک، روز از کاشت تا زمان برداشت و سایر صفات از

جمله عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک، شاخص برداشت و شاخص سطح برگ بود که در فصل رشد روی ۱۰ بوته در مترمربع مشخص انجام شد. بطوریکه ۱۰ بوته انتخاب و با یک نخ قرمز مشخص شدند و داده‌های به‌دست آمده به هکتار تعمیم داده شدند همچنین هر دو روز یک‌بار و تا زمان ورود ۵۰ درصد بوته‌ها به هر مرحله فنولوژیکی مراحل ثبت ادامه داشت.

جدول ۱- مشخصات خاک محل اجرای آزمایش

Table1-Soil characteristics in experimental place

ویژگی‌ها **Characteristic**	مقدار **Mount**
گوگرد Sulphor (ppm)	45.3
هدایت الکتریکی EC ($dS.m^{-1}$)	1.44
اسیدیته PH	7.2
درصد مواد خنثی شونده T.N.V (%)	9.5
کربن آلی Organic C (%)	1.5
نیتروژن N (ppm)	0.15
فسفر قابل جذب Absolutely P (ppm)	5.8
پتاسیم قابل جذب Absolutely P (ppm)	280
رس Clay (%)	29
لای Silt (%)	54
ماسه Sand (%)	18

مدل SSM-iSorghum قادر است تأثیر عوامل محیطی مانند آب و هوا، خصوصیات خاک و نیز تصمیمات مدیریتی مزرعه را ارزیابی نماید. این مدل مراحل فنولوژی، تجمع و تسهیم ماده خشک، شاخص سطح برگ، رشد ریشه، ساقه، برگ و دانه و همچنین توازن رطوبت و نیتروژن خاک، میزان مصرف آب و نیتروژن گیاه و تأثیر تنش‌های آب و نیتروژن را بر رشد و نمو گیاه شبیه‌سازی نماید. داده‌های و اطلاعات مورد نیاز اجرای مدل بر اساس موقعیت مکانی، طول و عرض جغرافیایی، ارتفاع از سطح دریا، میانگین درجه حرارت سالانه و اطلاعات هواشناسی شامل داده‌های روزانه مربوط به درجه حرارت حداقل، حداکثر، تشعشع خورشیدی و مقدار بارندگی و اطلاعات خاکشناسی شامل بافت خاک، ساختمان خاک، تعداد و عمق هر یک از لایه‌های، وزن مخصوص ظاهری، عناصر غذایی و ظرفیت نگهداری، نقطه پژمردگی، عمق نفوذ ریشه، میزان EC و pH و عملیات زراعی شامل نوع رقم و تیپ آن، تاریخ کاشت، عمق کاشت، فاصله خطوط، تراکم کاشت، تاریخ‌های آبیاری و مقدار آب آبیاری می‌باشد. داده‌های و اطلاعات مورد نیاز برای واسنجی و بررسی صحت مدل شامل: کاشت تا سبز شدن، روز از کاشت تا پایان مرحله رویشی، روز از کاشت تا شروع خوشه‌دهی، روز از کاشت تا پایان رشد برگ روی ساقه اصلی، روز از کاشت تا گل‌دهی، روز از کاشت تا شروع رشد دانه، روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک، روز از کاشت تا زمان برداشت و سایر صفات از جمله عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک، شاخص برداشت و شاخص سطح برگ بود. مدل SSM-iSorghum تحت زبان Q. Baisic دارای یک برنامه اصلی است که زیربرنامه‌های مختلفی را فراخوانی می‌کند و در هر یک از این زیربرنامه‌ها مدل‌سازی نمو فنولوژیک (با روش مبتنی بر دما و فنولوژیک) انجام می‌دهد. یکی از روش‌های تعیین پارامترهای

شبیه‌سازی مدل استفاده از تحقیقات و مشاهدات صحرایی است که با استفاده از نتایج تحقیقات میدانی داخل کشور و ارقام مورد مطالعه این امر محقق شد. برخی از ورودی‌های مورد نیاز مدل حاصل نتایج مشاهدات مزرعه‌ای و سایر اطلاعات شامل داده‌های متغیرهای هواشناسی و متغیرهای مدیریت زراعی است. این مدل جهت شبیه‌سازی پارامترهای مختلف فنولوژیکی نیازمند یک‌سری اطلاعات پایه بوده که در جدول ۲ آورده شده است. برای استفاده از این مدل در ابتدا نسبت به تعریف یکسری سناریو بر اساس تاریخ کاشت و تراکم مورد مطالعه در آزمایش مزرعه‌ای اقدام گردید و سپس خروجی مدل (خروجی‌های مربوط به مراحل فنولوژی، حداکثر سطح برگ، عملکرد دانه و بیولوژیک و شاخص برداشت) با استفاده از داده‌های واقعی به‌دست آمده از آزمایش مزرعه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفت. اطلاعات هواشناسی و اقلیمی بر اساس داده‌های ۱۵ ساله (۹۰-۱۳۷۵) ایستگاه هواشناسی هاشم‌آباد گرگان مورد استفاده قرار گرفت. ضرایب آنگستروم a و b باتوجه به مکان آزمایش به‌ترتیب برابر با ۰/۲۴ و ۰/۵۲ در نظر گرفته شد. مقدار تابش روزانه خورشید SRAD[1] از روی تعداد ساعات آفتابی محاسبه شد و برای اجرای مدل ۲۰ سناریو شامل تاریخ‌های مختلف کاشت و تراکم‌های مزرعه‌ای تعریف گردید (جدول ۲).

جهت مقایسه داده‌های شبیه‌سازی شده با داده‌های اندازه گیری شده از آزمایشات مزرعه‌ای، از شاخص‌های ارزیابی شامل ضریب تبیین (R^2)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE[2])، جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE[3]) و خط ۱:۱ استفاده گردید.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{N}} \times 100$$

معادله (۱)

معادله (۲)

$$Normalized\ RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{N}} \times \frac{100}{\bar{O}}$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})^2}$$

معادله (۳)

که در این معادله‌ها، P_i، O_i و $\bar{O}$: به‌ترتیب مقادیر شبیه‌سازی، مشاهده شده و میانگین مشاهدات برای متغیرهای مورد مطالعه و N: تعداد مشاهدات است. در صورتی که NRMSE به‌دست آمده کمتر از ۱۰ درصد باشد، شبیه‌سازی بسیار عالی، اگر بین ۱۰ تا ۲۰ درصد باشد، شبیه‌سازی خوب، اگر بین ۲۰ تا ۳۰ درصد باشد، شبیه‌سازی نسبتاً خوب و در صورتی‌که این شاخص آماری بزرگ‌تر از ۳۰ درصد باشد، شبیه‌سازی ضعیف خواهد بود. هرچه مقدار R^2 حاصل از رگرسیون خطی توابع و خط ۱:۱ به یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده همبستگی بالا بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده است که نشان‌دهنده توصیف بهتر مدل در شبیه‌سازی صفت مورد نظر می‌باشد (Feyzbakhsh et al., 2014).

نتایج و بحث

خصوصیات فنولوژیک: نتایج حاصل از مدل بیانگر پاسخ‌گویی خوب مدل برای مراحل مختلف فنولوژیکی گیاه سورگوم دانه‌ای و عملکرد در شرایط گرگان بود. مدل تمامی مراحل رشد و نمو شامل: روز از کاشت تا سبز شدن و روز از کاشت تا شروع خوشه‌دهی، روز از کاشت تا پایان فاز رویشی، روز از کاشت تا پایان رشد برگ بر روی ساقه اصلی، روز از کاشت تا گل‌دهی، روز از کاشت تا شروع رشد دانه، روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک، روز از کاشت تا زمان برداشت و شاخص سطح برگ و عملکرد را به‌خوبی برآورد کرد. نتایج مدل با استفاده از آماره‌های مبتنی بر اختلاف مقادیر شبیه‌سازی و مشاهده شده نشان داد که مدل SSM مراحل فنولوژیک در تاریخ کشت‌های مختلف و تراکم‌های متفاوت را به‌خوبی پیش‌بینی می‌کند. بالاترین ضریب تبیین (R^2) مربوط به روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک و روز از کاشت تا زمان برداشت با مقدار ۰/۹۴ و ۰/۹۱ درصد به‌دست آمد، بنابراین مدل می‌تواند در برنامه‌ریزی مدیریتی تخمین مراحل فنولوژی مزرعه مورد استفاده قرار گیرد (جدول ۴).

روز از کاشت تا سبز شدن: مقادیر مشاهده شده روز از کاشت تا سبز شدن در آزمایش مزرعه‌ای به‌ترتیب در محدوده حداقل و حداکثر چهار و هفت روز و میانگین ۴/۸ روز اندازه گیری شد، همچنین مقادیر نتایج شبیه‌سازی شده در محدوده چهار و شش روز و میانگین ۴/۷ به‌دست آمد (جدول ۴). مقایسه روز تا سبز شدن مشاهده شده و شبیه‌سازی شده نشان داد که بیشتر داده‌ها در محدوده خط ۱:۱ قرار دارند که بیانگر کارایی مناسب مدل می‌باشد (شکل ۱- a)، ضریب تبیین برای این مقادیر در خصوص روز از کاشت تا سبز شدن

۱- Solar radiation

۲- Root mean square error

۳- Normalized root mean square error

برابر ۰/۷۳ به‌دست آمد. جذر میانگین مربعات خطا و مقادیر نرمال شده آن به‌ترتیب ۰/۳۷ و ۰/۱۳ روز محاسبه شد (جدول ۴). این موضوع نشان‌دهنده این است که مدل قادر به شبیه‌سازی دقیق می‌باشد.

روز از کاشت تا انتهای دوره رویشی: نتایج نشان می‌دهد که مدل، روز تا پایان دوره رویشی را نیز به‌خوبی شبیه‌سازی نموده به‌نحوی‌که ضریب تبیین، جذر میانگین مربعات خطا و جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده، بین داده‌های به‌دست آمده از آزمایشات مزرعه‌ای و داده‌های شبیه‌سازی شده از مدل به‌ترتیب ۰/۶۳، ۲/۲۸ و ۵/۲۲ به‌دست آمد (جدول ۴). مقایسه داده‌های حاصل مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده نسبت به خط ۱:۱ در محدوده ۱۵± درصد این خط قرار گرفتند (شکل ۱- b) که بیانگر پیش‌بینی خوب مدل برای شبیه‌سازی مرحله فنولوژیکی روز تا پایان انتهای دوره رویشی سورگوم دانه‌ای بود.

جدول ۲- پارامترهای ورودی مورد نیاز مدل (سلطانی و سینکلر، ۲۰۱۲)

Table2- Needed input parameters for model (Soltani & Sinclair, 2012)

داده‌های هواشناسی و اقلیمی **Weather and climate data**	واحد Unit پارامتر (مخفف) **Parameter (abbreviation)**
حداکثر دمای روزانه Maximum daily temperature (TMAX)	درجه سلسیوس Degree celsius (°C)
حداقل دمای روزانه Minimum daily temperature (TMIN)	درجه سلسیوس Degree celsius (°C)
تابش خورشیدی روزانه Solar radiation (SRAD)	میکرو ژول مترمربع در روز µj.m^2 day
بارندگی روزانه Daily rainfall (RAIN)	میلی‌متر mm
ویژگی‌های خاک Soil characteristics	
آلبیدو Albedo (SALB)	واحد ندارد
ضریب زهکشی Drainage factor (DRAINF)	واحد ندارد
کسر حجمی رطوبت در نقطه پژمردگی Volumetric soil water content at drained upper limit(IDUL)	$cmcm^{-1}$
کسر حجمی رطوبت در نقطه ظرفیت زراعی Volumetric soil water content at crop lower limit(ILL)	$cmcm^{-1}$
کسر حجمی رطوبت در نقطه اشباع Volumetric soil water content at saturation(ISAT)	$cmcm^{-1}$
شماره منحنی خاک Curve number (CN)	واحد ندارد
مدیریت زراعی Agronomic management	
تاریخ کاشت Sowing date (PDOY)	Day of year since the 1st January
تراکم Density (DEN)	Plant per square meter
رطوبت خاک در موقع کاشت Initial soil water in sowing time (ISW)	mm
کسر آب قابل تعرق خاک برای انجام آبیاری Irrigation threshold level (IRGLVL)	واحد ندارد

جدول ۳- مقادیر پارامترهای مورد استفاده در مدل SSM-iSorghum برای شبیه‌سازی سورگوم (Soltani & Sinclair, 2012)

Table 2- The values of the parameters used in the model SSM-iSorghum- parameters simulate for Sorghum (Soltani & Sinclair, 2012)

پارامتر Parameter	مخفف Abv	واحد Unit	مقدار Value
روز از کاشت تا سبز شدن Day of planting to emergence	bdSOWEMR	day	4
روز از کاشت تا انتهای دوره رویشی Day from sowing to end of vegetative period	bdEMREJU	day	20
روز از کاشت تا شروع خوشه دهی Day from planting to the beginning of the cluster	bdEJUPNI	day	19
روز از کاشت تا پایان رشد برگ روی ساقه اصلی Day from planting to the end of growth on the main stem	bdPNITLM	day	10
روز از کاشت تا گل‌دهی Day from planting to flowering	bdTLMANT	day	12
روز از کاشت تا شروع رشد دانه Day from sowing to the beginning of seed growth	bdANTBSG	day	18
روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک Day of the planting to the physiological examination	bdBSGPM	day	5
روز از کاشت تا زمان برداشت Day from planting to maturity time	bdPMHM	day	10
دمای پایه نمو Base temperature for development	TBD	ºC	8
دمای مطلوب تحتانی برای نمو Lower optimum temperature for development	TP1D	ºC	34
دمای مطلوب فوقانی نمو Upper optimum temperature for development	TP2D	ºC	37
دمای سقف نمو Ceiling temperature for development	TCD	ºC	45
فتوپریود Critical photoperiod	CPP	ºC	14
ضریب حساسیت به فتوپریود Photoperiod sensitivity coefficient	ppsen	ºC	1.75
کارایی استفاده از تشعشع در شرایط مطلوب رشد Radiation use efficiency under optimal growth conditions	IRUE	$g.MJ^{-1}$	3.3
عمق ریشه در موقع سبز شدن Depth of root at emergence	iDEPORT	mm	150
حداکثر عمق مؤثر استخراج آب از خاک توسط ریشه Maximum effective depth of water extraction from soil by roots	MEED	mm	1300

روز از کاشت تا شروع خوشه دهی: مقایسه ضریب تبیین حاصل از آنالیز رگرسیون خطی توابع بین مقادیر روز تا شروع خوشه‌دهی اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده گیاه سورگوم دانه‌ای در شرایط گرگان نشان داد که مدل ارزیابی نسبتاً خوبی از این پارامتر داشت (R^2 =۰/۵۰). علاوه‌بر آن، جذر میانگین مربعات خطا و جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده نیز به‌ترتیب ۳/۱۹ و ۱۰/۱۹ به‌دست آمد که بیانگر شبیه‌سازی خوب این پارامتر توسط مدل بود (جدول ۴). شکل مربوط به مقادیر اندازه‌گیری شده روز تا شروع رشد خوشه‌دهی و مقادیر شبیه‌سازی شده آن نیز نشان می‌دهدکه تمامی داده‌ها در محدوده ۱۵± درصدی خط ۱:۱ قرار داشتند (شکل ۲- a).

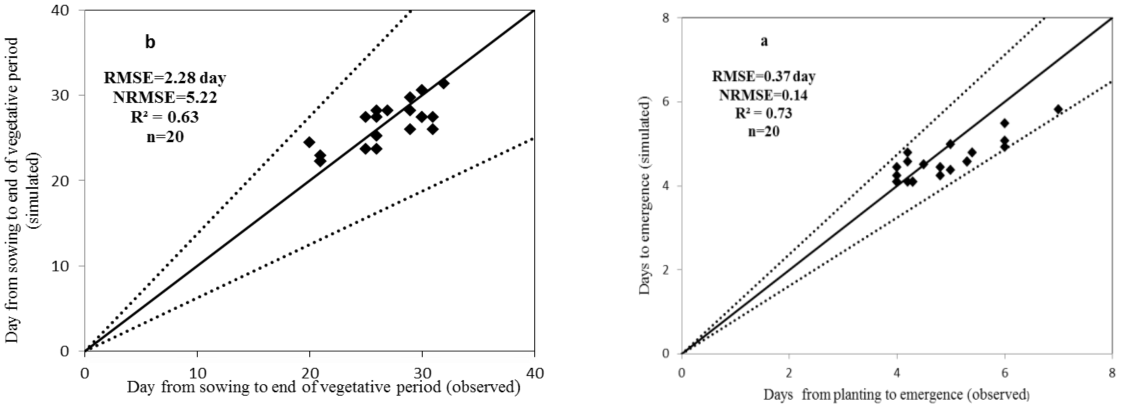
روز از کاشت تا پایان رشد برگ روی ساقه اصلی: مقادیر روز تا پایان رشد برگ روی ساقه اصلی مشاهده شده در محدوده ۴۲ تا ۶۶ روز و میانگین ۵۴/۹ روز بود، همچنین مقادیر شبیه‌سازی شده از مدل نیز تقریباً در دامنه‌ای مشابه با اعداد مشاهده شده قرار داشتند، به‌نحوی‌که حداکثر و حداقل روز تا پایان رشد برگ روی ساقه اصلی شبیه‌سازی شده به‌ترتیب ۴۹ و ۶۲ روز و میانگین

۵۵ روز به‌دست آمد. همچنین ضریب تبیین، جذر میانگین مربعات خطا و جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده به‌ترتیب برابر ۰/۴۴، ۳/۳۰ و ۱۰/۸۷ بوده که همگی نشان‌دهنده پیش‌بینی خوب مدل می‌باشد (جدول ۴). مقادیر روز تا پایان رشد برگ روی ساقه اصلی مشاهده شده و پیش‌بینی شده مدل نیز در محدوده ۱۵ ± درصد از خط ۱:۱ قرار گرفتند (شکل ۲- b).

جدول ٤- پارامترهای ریاضی و آماری مربوط به صفات مختلف مورد مطالعه به‌دست آمده از مدل و آزمایشات مزرعه‌ای

Table 4– Mathematical and statistical parameters related to the various traits studied by the model and field experiments

صفت Parameter	حداکثر Maximum		حداقل Minimum		میانگین Mean		پارامترهای آماری Statistical parameters		
	مشاهده شده Observed	شبیه‌سازی شده Simulated	مشاهده شده Observed	شبیه‌سازی شده Simulated	مشاهده شده Observed	شبیه‌سازی شده Simulated	ضریب تبیین R2	میانگین مربعات خطا RMSE	میانگین مربعات خطای نرمال شده NRMSE
روز از کاشت تا سبز شدن Day of planting to emergence	7	6	4	4	4.9	4.7	0.73	0.13	0.37
روز از کاشت تا انتهای دوره رویشی Day from sowing to end of vegetative period	33	32	21	20	26	26.5	0.63	2.28	5.22
روز از کاشت تا شروع خوشه‌دهی Day from planting to the beginning of the cluster	55	53.2	38	39	44.9	45.70	0.50	3.19	10.19
روز از کاشت تا پایان رشد برگ روی ساقه اصلی Day from planting to the end of growth on the main stem	66	62	42	49	54.9	55	0.44	3.30	10.87
روز از کاشت تا گل‌دهی Day from planting to flowering	69	69	46	50	58.7	62.6	0.67	4.18	17.49
روز از کاشت تا شروع رشد دانه Day from sowing to the beginning of seed growth	87	95	64	66	75.79	81.67	0.73	4.43	19.65
روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک Day of the planting to the physiological examination	102	99	72	74	82.95	84.05	0.94	1.97	3.88
روز از کاشت تا زمان برداشت Day from planting to maturity time	107	117	84	83	93.14	95.88	0.91	3.58	12.83
شاخص سطح برگ Leaf area index	4.76	4.80	2.11	2.25	3.45	3.52	0.69	0.23	0.48
شاخص برداشت Harvest Index (%)	29.62	30.58	10.24	9.80	20.16	18.85	0.66	3.03	6.17
عملکرد بیولوژیک Biological yield ($t.ha^{-1}$)	33.65	28.61	11.62	10	22.12	21.49	0.86	2.94	8.67
عملکرد دانه Grain yield ($t.ha^{-1}$)	7.43	6.60	2.35	2.20	4.24	3.92	0.78	0.70	0.43

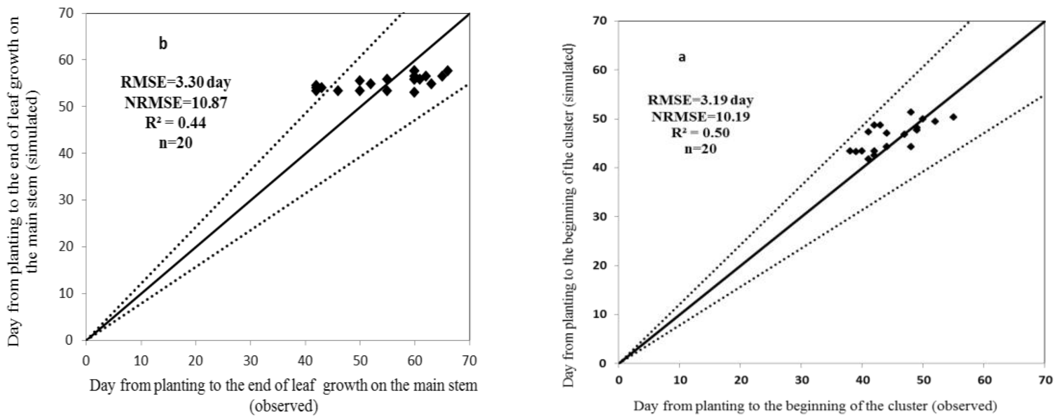


شکل ۱- روز از کاشت تا سبز شدن مشاهده شده در مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده آن (a) و روز از کاشت تا انتهای دوره رشد رویشی مشاهده شده در مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده آن (b)

Fig. 1- Observed days from planting to emergence in comparison it's simulated (a) and days from sowing to end vegetative period in comparison its simulated (b)

خط توپر، معرف خط۱:۱ و خطوط نقطه چین بالا و پایین بیانگر ۱۵ ± درصد می‌باشد.

Continuous line is line 1:1 and upper and lower dashed lines are ± 15%.



شکل ۲- روز از کاشت تا شروع خوشه‌دهی مشاهده شده در مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده آن (a) و روز از کاشت تا پایان رشد برگ بر روی ساقه اصلی مشاهده شده در مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده آن (b)

Fig. 2- Observed days from the planting to the beginning of the cluster in comparison its simulated values (a) and days from planting to the end of leaf growth on the main stem in comparison its simulated values (b)

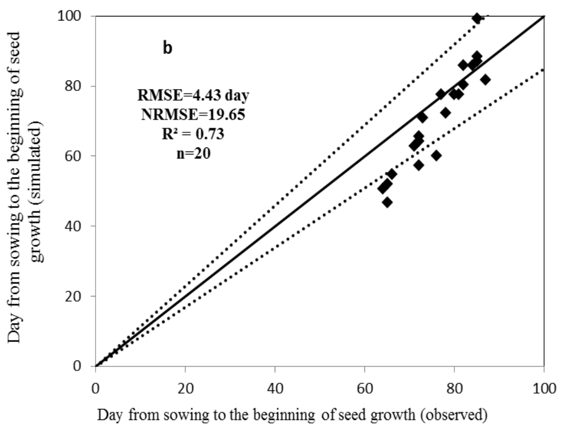
خط توپر، معرف خط۱:۱ و خطوط نقطه چین بالا و پایین بیانگر ۱۵ ± درصد می‌باشد.

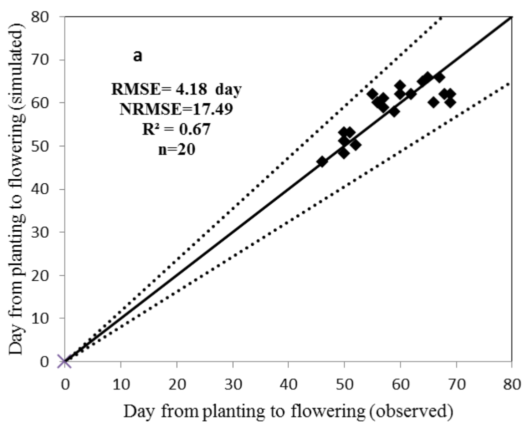
Continuous line is line 1:1 and upper and lower dashed lines are ± 15%.

روز از کاشت تا گل‌دهی: نتایج مطالعه نشان داد که روز تا گل‌دهی شبیه‌سازی شده از دقت مطلوب‌تری نسبت به سایر پارامترهای مورد مطالعه برخوردار بود، به‌نحوی‌که مقدار حداکثر روز تا گل‌دهی که بوسیله مدل شبیه‌سازی شده، در محدوده ۷۰ روز و حداقل این عدد در محدوده۵۰ روز و با میانگین ۶۲/۶ روز پیش‌بینی گردید. همچنین حداکثر، حداقل و میانگین روز تا گل‌دهی به‌دست آمده از مشاهدات مزرعه‌ای به‌ترتیب برابر ۶۹، ۴۶ و ۵۸/۷ روز بود. ضریب تبیین به‌دست آمده حاصل آنالیز رگرسیون خطی توابع بین روز تا گل‌دهی اندازه‌گیری شده و مقادیر شبیه‌سازی شده برابر ۰/۶۷ محاسبه شد که این مقدار به‌خوبی نشان می‌دهد که مدل از دقت

مطلوبی برای سنجش این پارامتر برخودار است (جدول ۴). همچنین سایر شاخص‌های آماری و شکل خط ۱:۱ نیز موید مطالب فوق می‌باشند (شکل ۳- a). لذا با توجه به نتایج فوق، مدل می‌تواند شبیه‌سازی مناسبی در مورد صفت روز تا گل‌دهی در شرایط شهرستان گرگان ارائه دهد. بر اساس گزارش نتایج سایر محققین از شبیه‌سازی مراحل فنولوژیکی (گل‌دهی و رسیدگی) برای دو رقم سویا سحر و کتول نشان داد که مدل SSM با دقت خوبی مراحل مذکور را شبیه‌سازی نموده است، به‌طوری‌که نتایج حاصل از ارزیابی فنولوژی مدل نشان داد، مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) برای روز تا گل‌دهی و رسیدگی به‌ترتیب ۵/۸ روز و ۸/۷ روز است که حدود ۱۱ درصد میانگین روز تا گل‌دهی و حدود شش درصد روز تا رسیدگی محاسبه شده است که نشان‌دهنده دقت بالای مدل در شبیه‌سازی مراحل فنولوژی است (Nehbandani et al, 2016).

روز از کاشت تا شروع رشد دانه: مقایسه ضریب تبیین حاصل از آنالیز رگرسیون خطی توابع بین مقادیر روز تا شروع رشد دانه مشاهده شده و شبیه‌سازی شده گیاه سورگوم دانه‌ای در شرایط گرگان نشان داد که مدل از دقت کافی برای شبیه‌سازی پارامتر مذکور داشت (R^2=۰/۷۳). علاوه‌بر آن، جذر میانگین مربعات خطا و جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده نیز به‌ترتیب با مقادیری ۴/۴۳ و ۱۹/۶۵ بیانگر شبیه‌سازی خوب این پارامتر توسط مدل بود (جدول ۴). شکل مربوط به مقادیر مشاهده شده روز تا شروع رشد دانه و مقادیر شبیه‌سازی شده نیز نشان داد که اکثر داده‌ها در محدوده ۱۵± درصد از خط ۱:۱ قرار داشتند (شکل ۳- b).





شکل ۳- روز از کاشت تا گل‌دهی مشاهده شده در مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده آن (a) و روز از کاشت تا شروع رشد دانه مشاهده شده در مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده آن (b)

Fig. 3- Observed days from planting to flowering in comparison its simulated values (a) and observed days from sowing to the beginning of seed growth in comparison its simulated values (b)

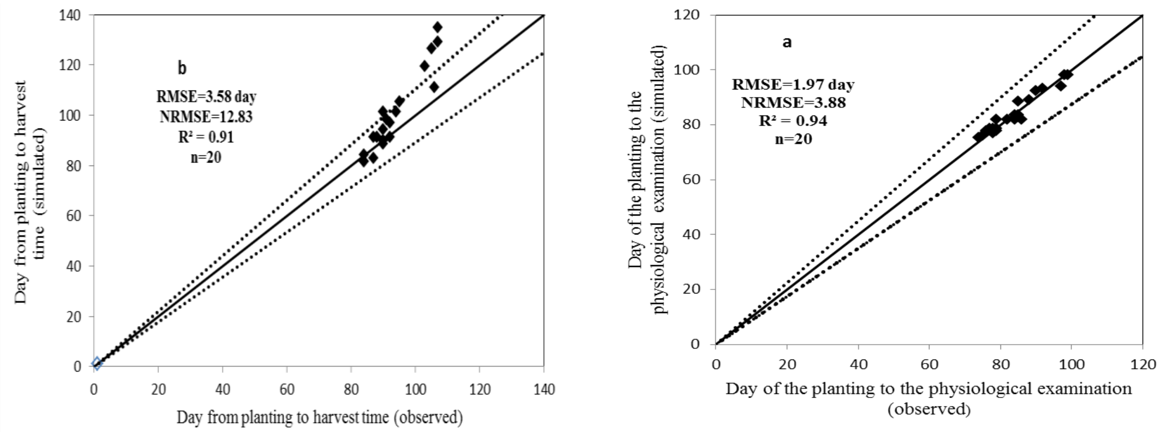
خط توپر، معرف خط۱:۱ و خطوط نقطه چین بالا و پایین بیانگر ۱۵ ± درصد می‌باشد.

Continuous line is line 1:1 and upper and lower dashed lines are ± 15%.

روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک: مقادیر روز تا رسیدگی فیزیولوژیک به‌دست آمده از مزرعه (مشاهده شده) در یک محدوده‌ای از مقادیر ۷۲ تا ۱۰۰ روز و میانگین ۸۲/۸۶ روز به‌دست آمد، در مقایسه اعداد به‌دست آمده از مدل نیز تقریباً در دامنه‌ای مشابه با مقادیر واقعی به‌دست آمد، به‌نحوی‌که حداکثر و حداقل روز تا رسیدگی فیزیولوژیک به‌دست آمده از مدل، به‌ترتیب در محدوده ۷۴ و ۹۹ روز و میانگین ۸۴/۰۵ روز به‌دست آمد (شکل ۴- a). در خصوص این صفت پارامترهای ضریب تبیین، جذر میانگین مربعات خطا و جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده، به‌ترتیب برابر ۰/۹۴، ۱/۹۷و ۳/۸۸ محاسبه شد که همگی نشان‌دهنده پیش‌بینی مطلوب مدل می‌باشد (جدول ۴).

روز از کاشت تا زمان برداشت: نتایج مطالعه نشان داد که روز از کاشت تا زمان برداشت شبیه‌سازی شده مدل از بالاترین دقت نسبت به سایر پارامترهای مورد مطالعه برخوردار بود، به‌طوری‌که مقدار حداکثر روز تا زمان برداشت بوسیله مدل شبیه‌سازی شد، که در محدوده ۱۲۱ روز و حداقل ۸۳ روز و با میانگین ۹۵/۸۶ روز قرار

داشتند. همچنین حداقل، حداکثر و میانگین روز تا زمان برداشت مشاهده شده آزمایشات مزرعه‌ای به‌ترتیب برابر ۸۴، ۱۰۷ و ۹۳/۱۴ روز بود (شکل ۴- b). بر اساس نظر سایر محققین نتایج حاصل از شبیه‌سازی مراحل فنولوژیکی (گرده‌افشانی و رسیدگی) برای ارقام گندم بیان داشتند، مدل SSM با دقت خوبی این مراحل را شبیه‌سازی نموده است، به‌طوری‌که نتاج حاصل از ارزیابی فنولوژی مدل نشان داد، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) برای روز تا گرده‌افشانی و روز تا رسیدگی ازدقت خوب مدل در پیش‌بینی مراحل فنولوژیکی ارقام گندم برخوردار است (Panahi et al., 2020).



شکل ٤- روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک مشاهده شده در مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده آن (a) و روز از کاشت تا زمان برداشت مشاهده شده در مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده آن (b)

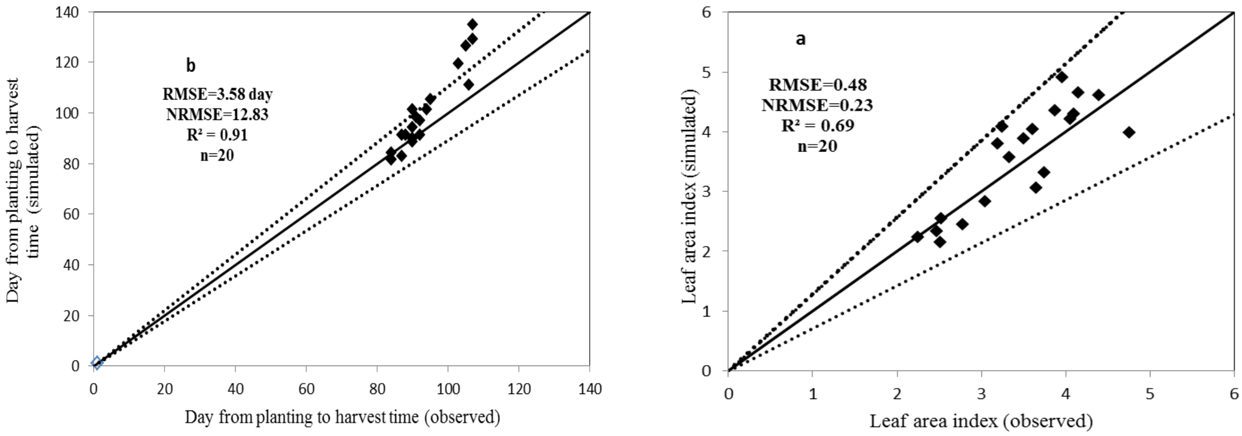
Fig.4- Observed day of planting to the physiological examination in comparison its simulated values (a) and observed day from planting harvest time in comparison its simulated values (b)

خط توپر، معرف خط ۱:۱ و خطوط نقطه چین بالا و پایین بیانگر ۱۵ ± درصد می‌باشد.

Continuous line is line 1:1 and upper and lower dashed lines are ± 15%.

شاخص سطح برگ: دامنه داده‌های شاخص سطح برگ در مشاهدات مزرعه‌ای در محدوده ۲/۱۱ تا ۴/۸۰ با میانگین ۳/۵۲ اندازه‌گیری شد و همچنین مقادیر شبیه‌سازی شده برای این صفت ۲/۲۵ تا ۴/۷۶ با میانگین ۳/۴۵ به‌دست آمد (جدول ۳). همان‌گونه که در شکل (۵- a) مشاهده می‌شود، پراکندگی نقاط حاصل از مقادیر مشاهده شده در مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده حول محدوده خط ۱:۱ قرار داشت. ضریب تبیین نیز نشان می‌دهد که به احتمال ۶۹ درصد داده‌های مشاهدات مزرعه‌ای شاخص سطح برگ با داده‌های شبیه‌سازی شده هم‌خوانی دارد، جذر میانگین مربعات اشتباه آزمایش و نرمال به‌ترتیب ۰/۴۸ و ۰/۲۳ بوده که نشان‌دهنده دقت برآورد مدل می‌باشد (جدول ۴). بر اساس مطالعه سایر محققین مدل SSM-Wheat برای پیش‌بینی رشد و عملکرد گندم در واکنش به کود نیتروژن، بیان داشتند توسعه شاخص سطح برگ تحت تأثیر میزان کود نیتروژن می‌باشد، بنابراین گسترش سطح برگ به‌عنوان یک عامل مهم تعیین می‌شود و میانگین مربعات خطای آزمایش و ضریب تبیین شاخص سطح برگ را ۱/۱۲ و ۰/۳۷ تعیین شده است (Moeinirad et al., 2017).

شاخص برداشت: بیشترین و کمترین دامنه داده‌های شاخص برداشت مشاهدات مزرعه‌ای به‌ترتیب ۲۹/۶۲، ۱۰/۲۴ با میانگین ۲۰/۱۶ متغیر بود و همچنین دامنه تغییرات بیشترین و کمترین شاخص برداشت شبیه‌سازی شده نیز در محدوده ۳۰/۵۸، ۹/۸۰ با میانگین ۱۸/۸۵ به‌دست آمد. ضریب تبیین، جذر میانگین مربعات خطا و جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده به‌ترتیب برابر ۰/۶۶، ۳/۰۳ و ۶/۱۷ به‌دست آمد (جدول ۴). نتایج نشان داد که مدل شبیه‌سازی مناسبی از شاخص برداشت سورگوم دانه‌ای برای شرایط گرگان می‌دهد. قرار گرفتن بیشتر داده‌ها در محدوده ۱۵± درصد خط ۱:۱ و شاخص‌های آماری نیز بیانگر توجیه مناسب مقادیر شبیه‌سازی شاخص برداشت توسط مدل بود (شکل ۵- b).



شکل ۵- شاخص سطح برگ مشاهده شده در مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده آن (a) و شاخص برداشت مشاهده شده در مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده آن (b)

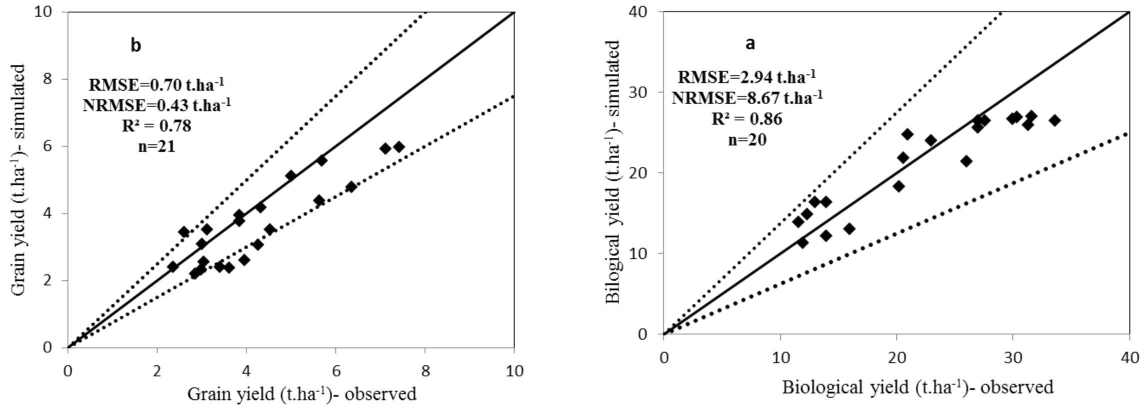
Fig. 5- Observed leaf area index in comparison its simulated values (a) and observed harvest index in comparison its simulated values (b)

خط توپر، معرف خط۱:۱ و خطوط نقطه چین بالا و پایین بیانگر ۱۵ ± درصد می‌باشد.

Continuous line is line 1:1 and upper and lower dashed lines are ± 15%.

عملکرد بیولوژیک: نتایج عملکرد بیولوژیک مشاهده شده در محدوده حداقل ۱۱/۶۲ تن در هکتار تا حداکثر ۳۳/۶۵ تن در هکتار و میانگین ۲۲/۱۲ تن در هکتار به‌دست آمد. نتایج شبیه‌سازی نیز مقادیر حداقل، حداکثر و میانگین عملکرد بیولوژیک را به‌ترتیب ۱۰، ۲۸/۶۱ و ۲۱/۴۱ تن در هکتار محاسبه نمود (جدول ۴). مقدار ضریب تبیین (R^2) ۸۶ درصد به‌دست آمد که می‌توان بیان نمود که داده‌ها به‌خوبی حول محدوده ۱۵± از خط ۱:۱ هستند، به همین دلیل مدل می‌تواند برای عملکرد بیولوژیک سورگوم دانه‌ای پیش‌بینی مناسبی ارائه دهد (شکل ۶- a). طبق نتایج سایر محققین مدل SSM-Wheat به‌خوبی عملکرد بیولوژیک پیش‌بینی نموده و ضریب تبیین و میانگین مربعات خطای آزمایش به‌ترتیب ۰/۷۴ و ۲۳۰۵/۶۲ محاسبه شده است که نشان‌دهنده شبیه‌سازی خوب مدل است (Moeinirad et al., 2017).

عملکرد دانه: بیشترین و کمترین داده‌های عملکرد دانه مشاهده شده به‌ترتیب ۷/۴۲-۲/۳۵ تن در هکتار با میانگین ۴/۲۴ تن در هکتار متغیر بود و دامنه بیشترین و کمترین عملکرد شبیه‌سازی شده نیز بین۶/۶۰- ۲/۲۰ تن در هکتار با میانگین ۳/۹۲ تن در هکتار به‌دست آمد، به نظر می‌رسد اختلاف تاریخ‌های کشت متفاوت دلیل اصلی افزایش دامنه عملکرد دانه باشد (جدول ۴). مقدار ضریب تبیین (R^2) ۰/۷۸درصد به‌دست آمد. در به‌کارگیری مدل‌ها برای پیش‌بینی عملکرد گزارش شده است، مقدار ضریب تبیین باید بیش از ۶۰ درصد باشد که این شرط در این مدل وجود دارد، در خصوص شکل بین عملکرد مشاهده شده و عملکرد شبیه‌سازی شده مشخص گردید که داده‌ها در محدوده ۱۵± درصد خط ۱:۱ قرار دارند، لذا مدل از دقت کافی برای پیش‌بینی عملکرد دانه در شرایط آب و هوایی گرگان برخودار است (شکل ۶- b). استفاده از یک مدل شبیه‌سازی برای رشد و عملکرد، بسته به پارامترهای ورودی آن مدل در منطقه مورد نظر دارد. بنابراین، حصول نتیجه مطلوب از به‌کارگیری مدل‌ها مستلزم شناخت مناسب از توانایی‌ها و محدودیت‌های آن‌ها دارد. نتایج سایر محققین در ارزیابی مدل SSM-Wheat در شرایط گرگان نشان می‌دهد نتایج شبیه‌سازی جنبه‌های مهم گیاهان زراعی در مقابل آزمایش‌های مشاهده شده شامل روز تا گرده‌افشانی، رسیدگی، شاخص سطح برگ و عملکرد دانه داشت که با نتایج حاصل از آزمایش مطابقت دارد.



شکل ٦- عملکرد بیولوژیک مشاهده شده در مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده آن (a) و عمکرد دانه مشاهده شده در مقایسه با مقادیر شبیه‌سازی شده آن (b)

Figures6: Observed biological yield in comparison its simulated values (a) and observed grain yield in comparison its simulated values (b)

خط توپر، معرف خط ۱:۱ و خطوط نقطه چین بالا و پایین بیانگر ۱۵ ± درصد می‌باشد.

Continuous line is line 1:1 and upper and lower dashed lines are ± 15%.

نتیجه‌گیری

ارزیابی مدل SSM-Sorghum نشان داد که این مدل مراحل فنولوژیکی شامل شاخص برداشت، شاخص سطح برگ، عملکرد بیولوژیک با تاریخ کاشت‌های مختلف و تراکم‌های متفاوت را با دقت مناسبی در شرایط آب و هوایی گرگان شبیه‌سازی می‌کند، همچنین ارزیابی مدل نشان داد در اکثر نقاط در محدوده قابل اطمینان (۱۵± درصد) از خط 1:1 قرار گرفتند که بیانگر برآورد صحیحی از پارامترهای مدل و یا تصدیق‌کننده کارآیی شبیه‌سازی مراحل روشد مدل است. بنابراین، مدل می‌تواند در برنامه ریزی‌های مدیریتی مزرعه شامل (انتخاب تاریخ مناسب کشت، تراکم مناسب) مورد استفاده قرار گیرد. اگرچه مدل مراحل فنولوژی رشد به‌خوبی شبیه‌سازی می‌کند، به نظر می‌رسد لازم است آزمون و دقت مدل با داده‌های حاصل از آزمایش‌های متنوع مجدداً انجام شود و در صورت تأیید نتایج این بررسی در معادلات به‌کار رود. بدیهی است که مدل‌ها زمانی مؤثر واقع می‌شوند که با تحلیل شرایط فیزیولوژیک و اکولوژیک و با توجه به آزمایشات و مشاهدات اندازه‌گیری تجربی از سیستم به‌کار گرفته شوند.

Refrences

Ahmadi Alipour, H., Soltani, A., Kazemi, H., and Nehbandani, A., 2017. Zoning Golestan province in terms of the ability and the wheat production gap using a simulation model (SSM). Journal Agricultural Crop Production 20: 129-144. (In Persian with English Summary). https://doi.org/10.22059/jci.2018.237053.1784.

Arnold, J.G., Moriasi, D.N., Gassman, P.W., Abbas Pour, K.C., White, M.J., Srinivasan, R., Santhi, C., Harmel, R.D., Griensven, A., Van Liew, M.W., and Kannan, N., 2012. SWAT: Model use, calibration, and validation. Transaction of the ASAE. American Society of Agricultural and Biological Engineers. 55: 1491–1508. http://doi.org/10.13031/2013.42256.

Arora, V.K., Singh, H., and Singh, B., 2007. Analyzing wheat productivity responses to climatic irrigation and fertilizer-nitrogen regimes in a semi-arid sub-tropical environment using the CERES-Wheat model. Agricultural Water Management 94: 22-30. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2007.07.002.

Azari-Nasrabad, A., and Ramazani, S.H., 2011. Correlation and path analysis in yield and its components in grain sorghum cultivars. Electronic Journal of Crop Production 4: 51-62. (In Persian with English Summary)

Carberry, P.S., 1991. Test of leaf-area development in CERES-Maize. Field Crops Research 27: 159-167. https://doi.org/10.1016/0378-4290(91)90028-T

Dadrasi, A., and Torabi, B., 2016. Predict the growth and yield of corn in Hamedan. Iranian Journal of Field Crop Sciences 47: 595-610. (In Persian with English Summary).

Dehghan, A., 2007. Effect of sowing date on yield and yield components of three grain sorghum cultivars in Khozestan. Science Journal Agricultural 30: 123-132. (In Persian with English Summary).

Droogers, P., Akbari, M., Torabi, M., and Pazira, E., 2000. Exploring Filed Scale Salinity using Simulaion Modeling, Example for Rudasht Area, Esfahan Provinc, Iran. (In Persian).

FAO, 2020. FAO statistical year book, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.

Hammer, G.L., Sinclair, T.R., Boote, K.J., Wright, G.C., Meinke, H., and Bell, M.J., 1995. A peanut simulation model: I. model development and testing. Agronomy Journal 87: 1085–1093. https://doi.org/10.2134/agronj 1995.00021962008700060009x Citations: 50.

Feyzbakhsh, M.T., Kamkar, B., Mokhtarpour, H., and Asadi, M.I., 2014. Assessment and evaluation of CERES-Maize model in Gorgan weather conditions. Journal of Crop Production 8: 25-49. (In Persian with English Summary)

Geoffrey, E.O., Wietse, H.P., Iwan, S., Omondi, P., and Ronald, W.A., 2018. Probabilistic maize yield prediction over East Africa using dynamic ensemble seasonal climate forecasts. Journal of Agricultural and Forest Meteorology 250(2): 243-261. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.12.256.

Ghanem, M.E., Marrou, H., Biradar, C., and Sinclair, T.R., 2015. Production potential of lentil (*Lens culinaris* Medik.) in East Africa. Agricultural System 137: 24–38. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2015.03.005

Kassie, B.T., Asseng, S., Porter, C.H., and Royce, F.S., 2016. Performance of DSSAT-Nwheat across a wide range of current and future growing conditions. European Journal of Agronomy 81: 27-36. https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.08.012.

Kobayashi, K., and Salam, M.U., 2000. Comparing simulated and measured values using mean squared deviation and its components. Agronomy Journal 92: 345-352. http://doi.org/10.2134/agronj2000.922345x.

KO, J., Piccinni, G., Guo, W., and Steglich, E., 2009. Parameterization of EPIC crop model for simulation of cotton growth in South Texas. Journal Agricultural of Science 147: 169–178. https://doi.org/10.1017/S0021859608008356.

Moeinirad, A., Zeinali, E., Soltani, A., Galeshi, S., and Yeganeh Poor, F., 2017. Investigation of SSM-Wheat model to forecast of growth and yield of wheat in response to fertilizer nitrogen in order to decrease pollution environmental and diseases. International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research 5: 73–78. http://doi.org/10.26655/ijabbr.2017.3.5

Morris, G.P., Ramu, R., Deshpande, S.P., Hash, C.T., Shah, T., Upadhyaya, H.D., and Kresovich, S. 2013. Ppulation genomic and genome-wide association studies of agroclimatic traits in sorghum. Proceeding of National Academy of Sci. 110: 2. 453-458. http://doi.org/10.1073/pnas.1215985110.

Messina, C.D., Sinclair, T.R., Hammer, G.L., Curan, D., Thompson, J., Oler, Z., Gho, C., and Cooper, M., 2015. Limited-transpiration trait may increase maize drought tolerance in the US Corn Belt. Agronomy Journal 107: 1978–1986. https://doi.org/10.2134/agronj15.0016.

Nehbandani, A.R., Soltani, A., Zeinali, E., Raeisi, S., and Rajabi, R., 2016. Parameterization and evaluation of SSM-soybean model for prediction of growth and yield of soybean in Gorgan. 2014. Journal of Plant Production 22: 1-26. (In Persian)

Panahi, M.H., A., Soltani, E., Zeinali, M., Kalateh Arabi, and Nehbandani, A.R., 2020. Estimation of phenological parameters in SSM-Wheat model for bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes in Golestan province of Iran. Iranian Journal of Crop Sciences 21(4): 302-314. (In Persian with English Summary). https://doi.org/10.29252/abj.21.4.302

Safari, M., Aghaalikhani, M., and Modares Sanavy, S.A., 2010. Effect of sowing date on phenology and morphological traits of three grain sorghum (*Sorghum bicolor* L.) cultivars. Iranian Journal of Crop Science 12: 452-466. (In Persian with English Summary). https://doi.org/20.1001.1.15625540.1389.12.4.7.0.

Schoppach, R., Soltani, A., Sinclair, T.R., and Sadok, W., 2017. Yield comparison of simulated rainfed wheat and barley across Middle-East. Agricultural System 153: 101–108. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.12.017.

Sciarresi, C., Patrignani, A., Soltani, A., Sinclair, T., and Lollato, R.P., 2019. Plant traits to increase winter wheat yield in semiarid and subhumid environments. Agronomy Journal 111: 1–13. https://doi.org/10.2134/agronj2018.12.0766.

Sinclair, T.R., 1986. Water and nitrogen limitations in soybean grain production I. model development. Field crop Research 15: 125–141. https://doi.org/10.1016/0378-4290(86)90082-1.

Sinclair, T.R., and Amir, J., 1992. A model to assess nitrogen limitations on the growth and yield of spring wheat. Field

crop Research 30: 63–78. https://doi.org/10.1016/0378-4290(92)90057-G.

Sinclair, T.R., and Muchow, R.C., 1995. Effect of nitrogen supply on maize yield: I. modeling physiological responses. Agronomy Journal 87: 632–641. https://doi.org/10.2134/agronj1995.00021962008700040005x.

Sinclair, T.R., Muchow, R.C., and Monteith, J.L., 1997. Model analysis of sorghum response to nitrogen in subtropical and tropical environments. Agronomy Journal 89: 201–207.

Sinclair, T.R., Messina, C.D., Beatty, A., and Samples, M., 2010. Assessment across the United States of the benefits of altered soybean drought traits. Agronomy Journal 102: 475–482. https://doi.org/10.2134/agronj2009.0195

Sinclair, T.R., Marrou, H., Soltani, A., Vadez, V., and Chandolu, K.C., 2014. Soybean production potential in Africa. Global Food Security 3: 31–40. https://doi.org/10.1016/j.gfs.2013.12.001

Sinclair, T.R., Soltani, A., Marrou, H., Ghanem, M., and Vadez, V., 2020. Geospatial assessment for crop genetic and management improvements. Crop Science. 60: 22.700-708. https://doi.org/10. 1002/csc2.20106. Accepted.

Soltani, A., Rezaei, A., and Khaje Pour, M.R., 2001. Genetic variety for some physiological and agronomic traits in grain sorghum. Journal Science Technology. Agricultural Nature Research 5: 127-136. (In Persian with English Summary)

Soltani, A., and Gholipoor, M. 2006. Simulation the impact of climate change on growth, yield and water use of chickpea. Journal of Agricultural Science and Natural Resources 13:2. 69-79.

Soltani, A., 2009. Mathematical modeling of the crop. Jahad Daneshgahi of Mashhad Press, Iran. 175 p. (In Persian)

Soltani, A., and Sinclair, T.R., 2011. A simple model for chickpea development, growth and yield. Field Crop Resources 124: 252–260. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.06.021.

Soltani, A., and Sinclair, T.R., 2012. Modeling Physiology of Crop Development, Growth and Yield. CABI Publication. 322 p.

Soltani, A., Maddah, V., and Sinclair, T.R., 2013. SSM-wheat: A simulation model for wheat development, growth and yield. International Journal of Plant Production 7: 711–740. https://doi.org/10.22069/IJPP.2013.1266.

Soltani, A., and Sinclair, T.R., 2015. A comparison of four wheat models with respect to robustness and transparency: Simulation in a temperate, sub-humid environment. Field Crop Resources 175(1): 37–46. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.10.019

Soltani, A., Alimagham, S.M., Nehbandani, A., Torabi, B., Zeinali, E., Dadrasi, A., Zand, E., Ghassemi, S., Pourshirazi, S., Alasti, O., Hosseini, R.S., Zahed, M., Arabameri, R., Mohammadzadeh, Z., Rahban, S., Kamari, H., Fayazi, H., Mohammadi, S., Keramat, S., Vadez, V., van Ittersum, M.K., and Sinclair, T.R., 2020. SSM-iCrop2: A simple model for diverse crop species over large areas. Agricultural Systms 182: 102855. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102855.

Wahbi, A., and Sinclair, T.R., 2005. Simulation analysis of relative yield advantage of barley and wheat in an eastern Mediterranean climate. Field Crop Resources 91: 287–296.

Vadez, V., Halilou, O., Hissene, H.M., Sibiry-Traore, P., Sinclair, T.R., and Soltani, A., 2017. Mapping water stress incidence and intensity, optimal plant populations, and cultivar duration for African groundnut productivity enhancement. Frontiers in Plant Scienc 1-13. https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00432.

Williams, J.R., Jones, C.A., Kiniry, J.R., and Spanel, D.A., 1989. The EPIC crop growth model. Transaction of the ASAE 32: 497–0511.